

高スペクトル分解ライダー信号を用いた雲リトリバーバル手法の検討

神 慶孝¹, 西澤 智明¹, 杉本 伸夫¹

¹ 国立環境研究所 (〒305-8506 茨城県つくば市小野川 16-2)

Retrieval Method of Cloud Extinction Using High-Spectral-Resolution Lidar signals

Yoshitaka JIN¹, Tomoaki NISHIZAWA¹, and Nobuo SUGIMOTO¹

¹ National Institute for Environmental Studies, 16-2 Onogawa, Tsukuba, Ibaraki 305-8506

Abstract: Interferometer-based high-spectral-resolution lidar (HSRL) signals for optically-thick clouds contain large amount of crosstalk due to strong Mie scattering, which can cause bias in extinction retrievals. In order to remove of crosstalk component from HSRL signals, interferometric effective transmittance for Mie scattering should be properly estimated. The effective transmittance is normally estimated using reference signals, but estimated values would contain random errors. This study proposes a method to correct effective transmittance combining HSRL and Klett methods. In this method, extinction coefficients by the Klett method are used as reference because the retrievals can be converged for optically-thick clouds at near ranges regardless of boundary conditions. By using the optimal effective transmittance, crosstalk can be properly removed, and therefore bias in cloud extinction retrievals can be minimized for the HSRL method.

Key Words: High-spectral resolution lidar, cloud, aerosol

1. はじめに

高スペクトル分解ライダー (HSRL) 手法は大気粒子からのミー散乱と大気分子からのレイリー散乱を分離して測定することで、大気粒子の消散係数と後方散乱係数を独立的に抽出することができる手法である。レイリー散乱を利用するためラマン散乱ライダー手法と比べて高感度で測定することができるため、日中でも高い時間分解能で消散係数を抽出することができる。レイリー散乱とミー散乱の中心波長はほぼ同じであるが、レイリー散乱は相対的にドップラー広がりが大きいため、狭帯域フィルターを通すことで両者を分離することができる。すなわち、狭帯域フィルターによってミー散乱をブロックし、レイリー散乱の一部を透過させる。狭帯域フィルター (ブロッキングフィルター) によるミー散乱のブロッキング性能はフィルターによって異なる。波長 532 nm で主に使われるヨウ素吸収フィルターはミー散乱を約 10^{-4} に抑えることができる一方で、干渉計では $10^{-2} \sim 10^{-1}$ に制限される。干渉計を使う場合、光学的に厚い雲に対してはミー散乱をブロックできず、レイリー散乱信号に混入するミー散乱のクロストークが無視できなくなる。クロストークは消散係数と後方散乱係数のリトリバーバルにおいてバイアスの原因となる。

本研究の目的は、HSRL 信号から抽出する雲の消散係数と後方散乱係数のバイアスを最小限にすることである。そのためには、レイリー散乱信号に含まれるミー散乱のクロストークを適切に取り除かなければならない。クロストークは全散乱 (ミー散乱 + レイリー散乱) 信号とブロッキングフィルターの有効透過率を用いて推定される。この時、有効透過率の推定精度が重要となる。有効透過率は通常リファレンス信号を用いるが、ランダムノイズの影響を受ける。本研究では、HSRL 手法と Klett 法を組み合わせて有効透過率を補正する手法を提案する。

2. HSRL 手法における消散係数の推定と誤差解析

HSRL 手法でブロッキングフィルターを通して測定される信号 (P_{HSR}) は以下の式で表される。

$$P_{\text{HSR}}(z) = \frac{K}{z^2} [\beta_1(z)X_1 + \beta_2(z)X_2] \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_1(z) + \alpha_2(z)] dz \right\}. \quad (1)$$

ここで、 z は高度、 K はシステム定数、 β と α はそれぞれ後方散乱係数と消散係数である。 X はブロッキングフィルターの有効透過率を示す。下付き文字の 1 と 2 はそれぞれ大気粒子と大気分子の成分を示す。式(1)の $\beta_1(z)X_1$ の項がクロストークであり、大気粒子の消散係数を抽出するために解析で取り除く必要がある。ク

ロストーク成分を取り除いたレイリー散乱信号 (P_{RAY}) は、全散乱信号 (P_{TOT}) を用いて以下の式で表される。

$$P_{RAY}(z) = \frac{P_{HSR}(z) - P_{TOT}(z)X_1}{X_2 - X_1} = \frac{K}{z^2} \beta_2(z) \exp \left\{ -2 \int_0^z [\alpha_1(z) + \alpha_2(z)] dz \right\}. \quad (2)$$

大気粒子の消散係数は式(2)から以下のように導出される。

$$\alpha_1(z) = -\frac{1}{2\Delta z} \Delta \log \left[\frac{P_{RAY}(z)z^2}{\beta_2(z)} \right] - \alpha_2(z). \quad (3)$$

消散係数の導出において、 P_{RAY} の推定精度が重要であり、式(2)中の X_1 を正しく与える必要がある。 X_1 に対する P_{RAY} のシステム誤差は以下の式で表される。

$$\frac{\Delta P_{RAY}(z)}{P_{RAY}(z)} = \frac{1}{P_{RAY}(z)} \frac{\partial P_{RAY}(z)}{\partial X_1} \Delta X_1 = -\frac{BR(z) + 1}{X_2 - X_1} \Delta X_1. \quad (4)$$

ここで、 BR は後方散乱比 ($= (\beta_1 + \beta_2)/\beta_2$) である。すなわち、 P_{RAY} の推定誤差は後方散乱比に比例する。水雲はエアロゾルと比べて後方散乱比が2桁以上大きいので、 X_1 の推定誤差が大きく影響する。

3. Klett 法を用いた X_1 補正係数の推定

X_1 は送信レーザー光の一部を使ったリファレンス信号を用いて推定される²⁾。しかし、推定された X_1 にはノイズによるランダム誤差が含まれている。前節で示したように X_1 の推定誤差が消散係数のリトリバル精度に大きく影響するため、 X_1 を補正する必要がある。補正係数を C として、補正された X_1 を $X_{1,cor}(=X_1 C)$ とする。式(2)の X_1 の代わりに $X_{1,cor}$ を用いて P_{RAY} を計算し、消散係数を抽出する。これとは別に、Klett 法を用いて消散係数を計算する。Klett 法と HSRL 手法を用いて計算した消散係数の差が最も小さくなるような補正係数を決定することで、 $X_{1,cor}$ を推定する。

Figure 1 に HSRL 手法と Klett 法による消散係数の計算例を示す。ここではマイケルソン干渉計を用いた HSRL (測定波長は 355 nm) の観測データを用いた。Klett 法では境界条件として遠方の消散係数を与える必要がある。光学的厚さが 1.5 を超える大気粒子層に対しては境界条件に関わらず近距離側の消散係数が約 5 % 以内に収束するため³⁾、近距離側 (ここでは高度 1500-1600 m) の消散係数をリファレンス値として使用できる。HSRL 手法で補正係数 C を変えながら消散係数を計算し、Klett 法との差が最も小さくなる時の補正係数を最適値とした。最適値から外れた場合の消散係数はプロファイル形状が Klett 法とは合わなくなる (Fig. 1 オレンジ線、緑線)。

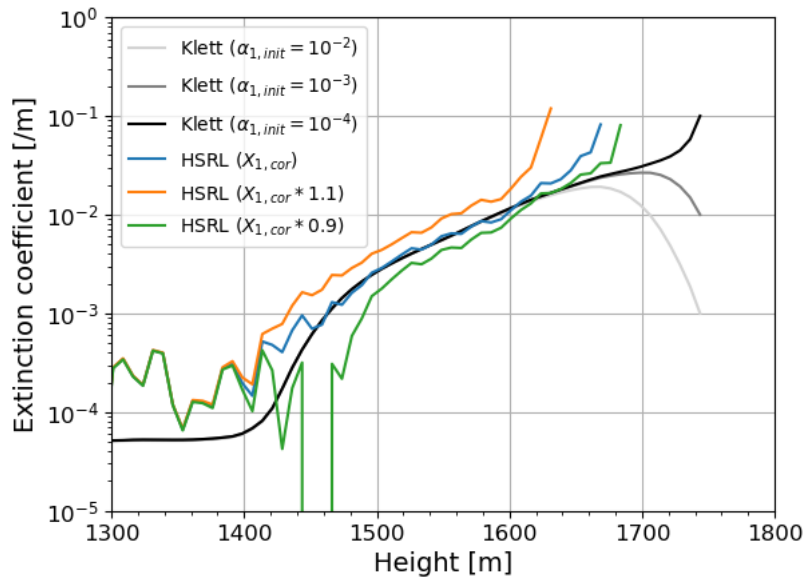


Figure 1. Retrievals of extinction coefficients using HSRL and Klett methods at 355 nm wavelength. $X_{1,cor}$ is corrected effective transmittance for Mie scattering.

4. 結論と今後の展望

干渉計を用いた HSRL 手法による雲の消散係数のバイアスを小さくするため、最適なクロストーク補正手法を提案した。Klett 法では光学的に厚い雲の消散係数が近距離側で収束することを利用し、リファレンス値として使用することで、ブロッッキングフィルターの有効透過率の補正係数を決定した。クロストークを取り除いたレイリー散乱信号と全散乱信号を組み合わせることで、消散係数だけでなく後方散乱係数の推定も可能となる。Figure 1 のケースでは手動で Klett 法の境界条件を決定したが、自動処理に向けて適用可能な光学的厚さや境界条件高度を決定する必要がある。本手法によって干渉計ベースの HSRL でも光学的に厚い雲の消散係数と後方散乱係数の推定が可能となる。衛星 EarthCARE ライダーの雲プロダクトの検証でも有効的に活用されることが期待される。

謝 辞

本研究は JSPS 科研費 JP22K03723, JP24H00275 の助成を受けたものです。

参考文献

- 1) J. D. Klett: Appl. Opt. **20** (1981) 211.
- 2) Y. Jin, T. Nishizawa, N. Sugimoto, S. Ishii, M. Aoki, K. Sato, H. Okamoto: Opt. Express **16** (2020) 23209.
- 3) Y. Jin, K. Kai, K. Kawai, N. Sugimoto, T. Nishizawa, I. Matsui, A. Shimizu, D. Batdorj: Proc. SPIE **9262** (2014) 92620M.